



بررسی عملکرد خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی-الیاف بازالت تقویت‌شده با نانوذرات خاک رس

ارسلان باقری تیرتاش¹، عباس منتظری²، رضا اسلامی فارسانی^{3*}، علیرضا شهربابی فراهانی⁴

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- استادیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

4- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی 119991-43344، eslami@kntu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این تحقیق، تاثیر افزودن نانوذرات خاک رس بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت تحت بارگذاری خمشی بررسی شد. برای بهبود توزیع این نانوذرات درون زمینه کامپوزیت، سطح آن‌ها توسط عامل کولپینگ تری گلیسیداکسی پروپیل تری متوکسی سیلان اصلاح سطحی شد و روند انجام این فرآیند با استفاده از آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز مورد تایید قرار گرفت. نتایج بدست آمده از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای نشان داد که در درصدهای وزنی 1، 3 و 5، بیشترین افزایش در خواص خمشی به ازای توزیع 5 درصد وزنی نانورس درون زمینه پلیمری کامپوزیت بدست می‌آید. در این درصد وزنی نانورس، استحکام خمشی، مدول خمشی، کرنش شکست و انرژی جذب‌شده به ترتیب به میزان 30، 38، 15 و 40 درصد افزایش یافت. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که افزودن نانورس اصلاح سطحی شده منجر به بهبود انتقال تنش بین الیاف بازالت و زمینه اپوکسی می‌گردد که این امر، تاثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با الیاف بازالت تحت بارگذاری خمشی دارد.

دریافت: 96/08/03

پذیرش: 97/07/19

کلیدواژه‌ها:

کامپوزیت هیبریدی

الیاف بازالت

نانوذرات خاک رس

اصلاح سطحی

عملکرد خمشی

An investigation on the flexural performance of basalt fibers-epoxy hybrid composites reinforced with nanoclay particles

Arsalan Bagheri Tirtash, Abbas Montazeri, Reza Eslami-Farsani*, Alireza Shahrabi-Farahani

Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

*Tehran, P.O.BOX: 19991-43344, eslami@kntu.ac.ir

Keywords

Hybrid composite
Basalt fibers
Nanoclay particles
Surface modification
Flexural performance

Abstract

In this investigation, consequence of introducing nanoclay particles on the flexural response of basalt fibers reinforced epoxy composites was examined. To improve the dispersion of nano reinforcements into the polymer matrix, their surface was modified with 3-glycidoxypropyltrimethoxysilane coupling agent (3-GPTS). Accordingly, the surface functionalization was vouched using Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). Results of the three-point bending test suggested that at 1, 3, 5 Wt. % the highest enhancement of flexural properties was achieved via 5 Wt. % of nanoclay particles. In this case, with the addition of 5 Wt. % of nanofillers, flexural strength, flexural modulus, failure strain and energy absorption were increased by 30, 38, 15 and 40 percent, respectively. Microscopic investigations demonstrated that presence of nanoclay particles within the structure of basalt fibers reinforced epoxy composites enhances the stress transfer between epoxy matrix and basalt fibers which, in turn, causes a significant improvement in the mechanical properties of basalt fibers reinforced polymer composites.

1- مقدمه

زیست‌محیطی مرتبط با تولید است [2,1]. به همین دلیل، در دو دهه‌ی اخیر، گرایش به طراحی نوآورانه مواد و روش‌های جدید ضمن توسعه‌ی مواد و روش‌های موجود گسترش یافته است. یکی از مهم‌ترین موادی که در سال‌های اخیر بیشترین سهم تحقیقات با محوریت طراحی و توسعه را به خود اختصاص داده‌اند، مواد کامپوزیتی تقویت شده با الیاف هستند. این مواد با هدف بهره‌مندی از قابلیت‌های چند ماده در کنار هم، توسعه یافته‌اند تا ضعف‌های هر یک از آن‌ها در صورت استفاده به صورت مجزا، پوشش داده

در سال‌های اخیر با پیشرفت چشمگیر حوزه‌ی مهندسی ساخت، توجه بیشتر به مسائل زیست محیطی و شتاب سرسام‌آور پدیده‌ی مصرف‌گرایی در جهان، انتخاب مواد مورد استفاده در ساخت محصولات، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته و دستاوردهای مهمی را در بخش‌های مختلف صنعتی به ارمغان داشته است. انتخاب مواد و همچنین انتخاب روش‌ها و تکنیک‌های موجود برای ساخت، عامل اصلی تعیین‌کننده هزینه تولید، زمان مصرفی و تاثیرات

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Bagheri Tirtash, A. Montazeri, A. Eslami-Farsani, R. and Shahrabi-Farahani, A., "An investigation on the flexural performance of basalt fibers-epoxy hybrid composites reinforced with nanoclay particles", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 525-532, 2020.

اثر نانورس در درصد‌های وزنی مختلف (0، 1.5 و 3) بر خواص خمشی کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه پرداختند که در آن، بیشترین افزایش در خواص خمشی با افزودن 1.5 درصد وزنی نانورس حاصل شد. این در حالیست که مشاهدات آنها نشان داد که با افزودن 3 درصد وزنی نانورس، خواص کامپوزیت تقلیل می‌یابد. پل و همکارانش [16]، تأثیر نانورس بر رفتار کششی کامپوزیت الیاف شیشه/اپوکسی را به طور تجربی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، به ازای افزودن 10 درصد وزنی نانورس، استحکام کششی کامپوزیت به میزان 8 درصد و مدول کششی آن به میزان 23 درصد نسبت به کامپوزیت فاقد فاز تقویتی افزایش یافت.

عملکرد نانوذرات خاک رس بر طبق تحقیقات صورت پذیرفته، وابسته به نحوه توزیع این نانوذرات درون ماده زمینه است. زیرا که اگر دارای توزیع مطلوب نباشند منجر به تنزل خواص مکانیکی تحت بارگذاری‌های مختلف می‌گردند. یکی از روش‌های مورد استفاده برای بهبود توزیع نانورس اصلاح سطحی آن‌ها با هدف کاهش تمایل به کلوخه‌ای شدن آن‌ها و دست یابی به توزیع مطلوب آن‌ها درون زمینه پلیمری می‌باشد. لذا رویکرد اصلی این تحقیق، بررسی اثر توزیع ذرات نانورس اصلاح سطحی شده با سیلان در زمینه پلیمری بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت تحت بارگذاری خمش سه نقطه‌ای است.

2- روش آزمایش

2-1- مواد اولیه

در این پژوهش از رزین اپوکسی با نام تجاری ML-506 همراه با هاردنر پلی‌آمین HA-11 متعلق به شرکت مواد مهندسی مکرر به عنوان ماده زمینه برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها استفاده شد. پارچه الیاف بازالت با بافت ساتن³ و دانسیته سطحی 300 گرم بر مترمربع به عنوان الیاف تقویت‌کننده بکار گرفته شد. ذرات نانورس مونتموریلونیت⁴ با ضخامت صفحات یک الی پنج نانومتر و طول 7 میکرومتر به عنوان تقویت‌کننده نانومتری مورد استفاده قرار گرفتند.

2-2- اصلاح سطحی نانورس

در ابتدا 5 گرم از نانورس به 100 میلی‌لیتر محلول شامل 95 میلی‌لیتر اتانول اضافه شد. در گام بعدی، عامل سیلان تری گلیسید اکسی پروپیل تری منوکسی سیلان که دارای گروه اپوکسید بوده و می‌تواند با گروه اپوکسیدی زمینه در حضور هاردنر آمینی واکنش دهد [17]، با نسبت 1 به 1 نسبت به نانورس به مخلوط فوق اضافه شد. مخلوط به دست آمده به مدت 10 دقیقه تحت امواج فراصوت قرار گرفته و سپس به مدت 8 ساعت در دمای 80 درجه سانتی‌گراد عملیات رفلاکس انجام شد. میزان PH محلول با استفاده از اسید کلریدریک 37 درصد در محدوده 4-5 تنظیم گردید. پس از انجام فرآیند رفلاکس، به منظور جداسازی نانورس، مخلوط ساخته‌شده به مدت 30 دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ تحت سرعت 4000 دور بر دقیقه قرار گرفت. سپس، نانورس بدست آمده به منظور خارج شدن عامل سیلان اضافی سه مرتبه توسط اتانول شستشو داده شده و به منظور خشک شدن به مدت 12 ساعت در دمای 80 درجه سانتی‌گراد در داخل آون قرار داده شد [18].

شود [4,3]. دو ویژگی برجسته کامپوزیت‌های الیافی، استحکام ویژه (نسبت استحکام به وزن بالا) و کنترل خواص ناهمسانی آن‌ها یعنی تابعیت خواص به جهت اندازه‌گیری است. استحکام ویژه بالای این نوع کامپوزیت‌ها سبب گردیده است که بتوانند از این نظر با بسیاری از مواد رقابت کنند. ویژگی ناهمسان بودن خواص این امکان را فراهم کرده که طراح بتواند در مکان‌های مورد نظر بدون افزایش وزن به خواص مطلوب دست یابد. این ویژگی‌ها همراه با دوام، مقاومت محیطی عالی و مقاومت خوب در برابر نیروهای خستگی سبب جلب توجه صنعت‌گران و گسترش روز افزون استفاده از این دسته کامپوزیت‌ها شده است [3]. با پیشرفت‌های صورت گرفته در حوزه فناوری نانو و ورود آن به صنعت پلیمر و کامپوزیت، انقلابی در زمینه تولید نانو کامپوزیت‌ها و دسترسی به خواص منحصر به فرد آن‌ها صورت پذیرفت [6,5]. در میان انواع نانوکامپوزیت‌ها، بیشترین توجه به نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری معطوف است. نانوکامپوزیت‌های پلیمری عموماً دارای نسبت استحکام به وزن بالا، پایداری حرارتی مناسب، رسانایی الکتریکی بالا و مقاومت شیمیایی بالایی هستند. [7]

یکی از مهم‌ترین تقویت‌کننده‌های نانومتری برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها، ذرات نانورس¹ هستند. این نانوذرات اساساً حاوی سیلیسیم، آلومینیم یا منیزیم، اکسیژن و هیدروکسیل با کاتیون وابسته گوناگون می‌باشند. این یون‌ها و گروه‌های هیدروکسیل در دو ساختار دوبعدی به صورت ورقه‌ای مرتب می‌شوند. ساختار نانورس از لایه‌های سیلیکات با ضخامت 1 نانومتر شامل صفحات سیلیسیم و آلومینیم که در نسبت‌های گوناگون به هم متصل شده و به شیوه معین با فاصله بین لایه‌های متغیر روی هم انباشته می‌شوند، تشکیل شده است. بین انواع مختلف کانی‌های رسی، مونت موریلونیت² پرکاربردترین ماده برای تهیه نانوکامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با نانورس است. [8-10] در طی سالیان اخیر، تحقیقات تجربی مطلوبی در رابطه با تأثیر توزیع ذرات نانورس بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تحت بارگذاری‌های مختلف انجام شده است که در این قسمت بدان پرداخته می‌شود. آیت‌اللهی و همکارانش [11]، نشان دادند که افزودن 5 درصد وزنی نانورس باعث افزایش 25 درصدی در چقرمگی شکست و افزایش 8 درصدی در مدول کششی در مقایسه با اپوکسی خالص می‌گردد. چان و همکارانش [12]، رفتار کششی نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با نانوذرات رس را بررسی کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که با افزودن 9 درصد وزنی ذرات نانو رس به زمینه اپوکسی، استحکام و مدول کششی فاز زمینه در مقایسه با کامپوزیت‌های فاقد نانورس، به ترتیب 29 و 34 درصد افزایش یافت. آلبدیری و همکارانش [13]، رفتار شکست کامپوزیت پلی‌استر/نانورس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق مشخص نمود که بالاترین مقدار افزایش در چقرمگی شکست به ازای افزودن 3 درصد وزنی نانورس حاصل می‌گردد که در این حالت، چقرمگی شکست به میزان 61 درصد نسبت به پلی‌استر خالص افزایش می‌یابد. چوداری و همکارش [14]، خواص مکانیکی کامپوزیت پلی‌استر/الیاف شیشه را تحت بارگذاری کششی و خمشی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین میزان بهبود در خواص کششی به ازای افزودن 3 درصد وزنی نانورس حاصل می‌شود. در این پژوهش، با استفاده از این مقدار فاز تقویتی، استحکام و مدول کششی کامپوزیت به ترتیب 14 و 30 درصد و استحکام و مدول خمشی آن نیز به ترتیب 28 و 26 درصد افزایش نشان داد. رافیق و همکارانش [15]، به بررسی

³ Satin texture

⁴ Montmorillonite

¹ Nano clay particles
Montmorillonite

3-2- روند ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی تقویت‌شده با ذرات نانورس اصلاح سطحی شده، ابتدا نانورس در مقادیر 0، 1، 3 و 5 درصد وزنی به رزین اپوکسی اضافه شد. سپس با استفاده از همزن مکانیکی سرعت بالا مخلوط اپوکسی-نانوذرات به مدت 20 دقیقه با قدرت 2000 دور بر دقیقه هم زده شد. در مرحله بعد امواج التراسونیک با استفاده از دستگاه التراسونیک پروبی تحت توان 120 وات و فرکانس 24 کیلوهرتز به مدت 1 ساعت به مخلوط اعمال شد. پس از اعمال امواج التراسونیک، به منظور از بین رفتن حباب‌های هوا ناشی از هم‌زدن سرعت بالا، مخلوط حاصل تحت شرایط خلا واقع شده، به عنوان ماده زمینه برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار گرفت. پس از توزیع ذرات نانورس درون زمینه پلیمری کامپوزیت، برای ساخت نمونه‌ها روش لایه‌گذاری دستی بکار گرفته شد که در طی آن 6 لایه پارچه الیاف بازالت با نسبت حجمی 50 درصد مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت، نمونه‌های ساخته شده به مدت 3-4 ساعت در دمای محیط قرار گرفتند تا عملیات پخت رزین صورت پذیرد. لازم به ذکر است که مطابق دستورالعمل شرکت سازنده رزین اپوکسی، انجام آزمون مکانیکی بر روی نمونه‌ها 7 روز پس از پخت اولیه نمونه‌ها صورت پذیرفت.

2-3- نتایج آزمون خمش

منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از آزمون خمش بر روی نمونه‌های نانوکامپوزیتی تقویت‌شده با مقادیر مختلف نانورس اصلاح سطحی شده در شکل 2 نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد روند شکست همه نمونه مشابه به یکدیگر بوده و وارد کردن نانورس در ساختار کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت باعث تغییر در خواص خمشی نظیر استحکام، مدول و کرنش شکست شده است. در جدول 1 نتایج بدست آمده از آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های نانوکامپوزیتی حاوی نانورس آورده شده است. همچنین، با هدف مشاهده بهتر و موثرتر روند تغییرات استحکام خمشی، مدول خمشی، کرنش شکست خمشی و انرژی شکست کامپوزیت‌های مورد نظر، تغییر این خواص در حضور درصد‌های مختلف خاک رس در اشکال سه الی شش آورده شده است. لازم به ذکر است همان‌طور که عنوان شد برای اطمینان از جواب‌ها، کلیه آزمایش‌ها چند بار تکرار گردیده و در نتیجه برای مشخص شدن محدوده خطای نتایج، این اعداد در این جدول ذکر شده است.

4-2- آزمون خمش سه نقطه‌ای

آزمون خمش بر روی نمونه‌های نانوکامپوزیتی با استفاده از دستگاه کوپا مطابق با استاندارد ASTM D790 انجام شد [19]. برای جلوگیری از سرخوردن نمونه‌ها حین آزمایش، هر طرف تکیه‌گاه باید حداقل 10 درصد از فاصله بین دو تکیه‌گاه بلندتر باشد. مطابق با استاندارد نسبت فاصله بین دو تکیه‌گاه به ضخامت نمونه برابر با 32 به 1 است. لازم به ذکر است که برای اطمینان از نتایج بدست آمده از آزمون‌های مکانیکی، هر آزمایش حداقل 3 بار تکرار شد.

5-2- بررسی میکروسکوپی

به منظور بررسی روند اصلاح سطحی ذرات نانورس و بررسی تشکیل گروه‌های عاملی بر روی سطح این نانوذرات از دستگاه طیف سنج مادون قرمز مدل Jasco-460 plus استفاده شد. همچنین برای بررسی سطح شکست نمونه‌ها و نحوه عملکرد ذرات نانورس از میکروسکوپ الکترونی عمق میدانی مدل Hitachi S-4160 با ولتاژ کاری 25 کیلوولت استفاده شد. برای بهبود رسانایی نمونه‌های نانوکامپوزیتی، پوششی از جنس طلا در محفظه‌ای تحت خلأ بر روی آن‌ها اعمال شد.

3- نتایج و بحث

1-3- بررسی روند اصلاح سطحی نانورس

در شکل 1 نتایج آنالیز طیف سنجی مادون قرمز نانورس اصلاح نشده و اصلاح سطحی شده با سیلان نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد برای نانورس اصلاح سطحی نشده (شکل 1-الف) پیک ایجاد شده در عدد موج 3445.3 به دلیل ارتعاشات کششی گروه‌های هیدروکسیل و پیک در عدد موج 1649.5 ناشی از ارتعاشات خمشی پیوندهای H-O-H بود. در مقابل، پیک به وجود آمده در عدد موج 3634.2، مربوط به ارتعاشات کششی پیوند Al-OH نسبت داده شد [20]. همچنین پیک قابل مشاهده در عدد موج

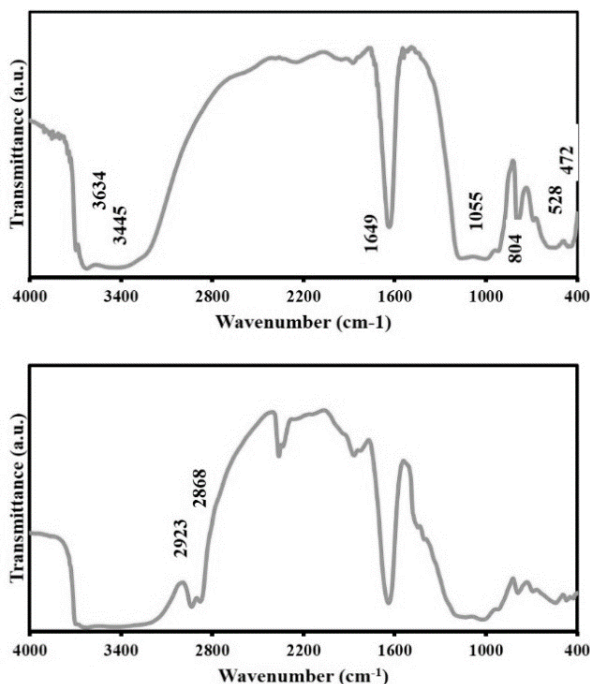


Fig. 1 FT-IR analysis results of a) non treated and b) silane treated nanoclay powders.

شکل 1 نتایج طیف‌سنجی مادون قرمز پودرهای الف) نانورس اصلاح نشده و ب) اصلاح سطحی شده با عامل سیلان.

³ High speed shear mixing

مشترک الیاف-زمینه که از مهم‌ترین مکانیزم‌های شکست تحت بارگذاری خمشی هستند، را افزایش می‌دهد [23]. موضوع مهم دیگر خاصیت آبدوستی¹ نانوذرات رس است. با توجه به این نکته که در ابعاد نانو سطح تماس افزایش می‌یابد نانوذرات رس تمایل زیادی به انباشتگی دارند که وقوع این مساله در فاز پلیمری مطلوب نبوده و به عنوان یک فاکتور موثر در جهت کاهش خواص مکانیکی نانوکامپوزیت عمل خواهد کرد. با اصلاح سطحی نانورس توسط عامل سیلان گروه‌های عاملی فعال با گروه‌های هیدروکسیل واقع بر روی سطح نانورس واکنش داده و در نتیجه با چسبیدن به سطح نانوذرات، سبب افزایش خاصیت آگریزی آن‌ها می‌شوند. سپس مونومرها با گروه‌های عاملی بر روی سطح نانورس واکنش داده و پلیمریزاسیون بر روی سطح نانورس ادامه می‌یابد. زنجیره‌های پلیمری با اتصال به سطح نانوذرات فضای خالی مابین آن‌ها را پر کرده و با کاهش سطح تماس نانوذرات، سبب کاهش آگلومره شدن آن‌ها می‌گردند که این موضوع، به نوبه خود منجر به بهبود عملکرد نانورس در افزایش خواص مکانیکی می‌شود [24].

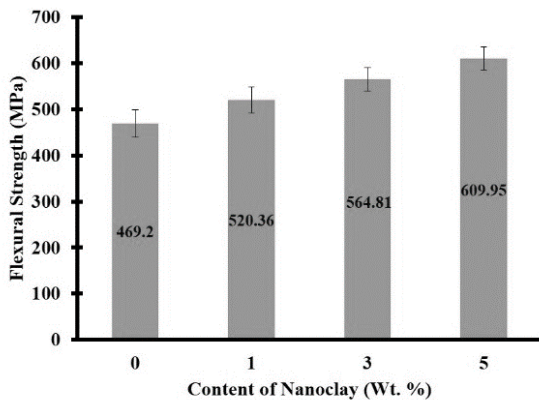


Fig. 3 Effect of adding modified nanoclay on the flexural strength of basalt fiber reinforced polymer composites.

شکل 3 تاثیر افزودن ذرات نانورس اصلاح شده بر استحکام خمشی کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف بازالت

در شکل 4 اثر افزودن مقادیر مختلف نانورس اصلاح شده بر مدول خمشی نمایش داده شده است. مشابه استحکام خمشی، مدول خمشی نیز با افزودن نانورس به طور پیوسته افزایش یافت. برای کامپوزیت حاوی 1 درصد وزنی نانورس مدول خمشی با 11 درصد افزایش از 16.52 به 18.35 گیگاپاسکال افزایش یافت. اما بیشترین بهبود در مدول خمشی با توزیع 5 درصد وزنی نانورس داخل ساختار کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف بازالت حاصل شد که مدول خمشی به میزان 38 درصد در مقایسه با کامپوزیت فاقد نانورس افزایش یافت. افزایش مدول خمشی در اثر افزودن نانورس، به دلیل توزیع مناسب این ذرات داخل زمینه پلیمری رخ است. افزایش مقدار نانورس همراه با توزیع مناسب این ذرات، باعث افزایش پیوند و چسبندگی بین سطحی نانورس و زمینه پلیمری شده که این پدیده، موجب محدود شدن جنبش و تحرک زنجیره‌های پلیمری هنگام بارگذاری می‌گردد. نتیجه این امر افزایش مدول خمشی نانوکامپوزیت است. از طرفی به دلیل سفتی بالاتر نانورس در مقایسه با زمینه اپوکسی، افزایش در مدول خمشی کامپوزیت در نتیجه افزودن این ذرات قابل انتظار بود [25].

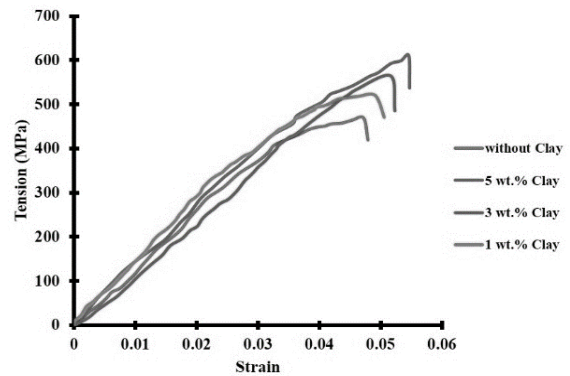


Fig. 2 Flexural stress-strain curves of the nanocomposite samples containing various weight percentages of nanoclay

شکل 2 منحنی‌های تنش-کرنش برای نمونه‌های نانوکامپوزیتی حاوی درصد‌های وزنی مختلف نانورس

جدول 1 نتایج مربوط به آزمون خمش سه نقطه‌ای برای نانوکامپوزیت حاوی نانورس

Table 1 Results of three-point bending test for the samples reinforced with nanoclay

درصد وزنی نانورس	استحکام خمشی (MPa)	مدول خمشی (GPa)	انرژی شکست (J/mm ³)	کرنش شکست
0	469.2±30	16.52±1.8	13.49±1.2	0.047±0.0025
1	520.36±28	18.35±1.7	14.81±1.2	0.049±0.0025
3	564.81±25	20.98±1.7	17.71±1.4	0.051±0.003
5	609.95±25	22.68±1.5	18.94±1.3	0.054±0.0028

شکل 3 اثر افزودن نانورس اصلاح سطحی شده را بر استحکام خمشی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف بازالت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با توزیع نانورس داخل زمینه استحکام خمشی به صورت پیوسته افزایش یافته و کاهش در روند استحکام مشاهده نشد. در این خصوص برای کامپوزیت‌های کنترلی که فاقد نانورس هستند، استحکام خمشی به مقدار 469.2 مگاپاسکال محاسبه شد. بیشترین بهبود در استحکام خمشی به ازای افزودن 5 درصد وزنی نانورس برابر با 609.95 مگاپاسکال بدست آمد که در مقایسه با نمونه شاهد، 30 درصد به استحکام خمشی کامپوزیت افزوده شد. در کامپوزیت‌های الیافی، چسبندگی بین سطحی زمینه و الیاف دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. دلیل این مطلب آن است که هنگامی که کامپوزیت تحت بارگذاری قرار می‌گیرد انتقال تنش از طریق فصل مشترک زمینه و الیاف صورت می‌پذیرد. در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری باید بین زمینه و تقویت کننده اتصال کامل و محکم و استوار برقرار باشد تا نیرو بتواند از زمینه به الیاف منتقل شود. علاوه بر آن چنانچه اتصال بین الیاف و زمینه تضعیف شود، الیاف در حین اعمال نیرو می‌تواند از زمینه بیرون کشیده شوند و نتیجتاً استحکام و مقاومت به شکست کامپوزیت کاهش می‌یابد [22]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اضافه نمودن نانورس اصلاح سطحی شده به زمینه کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت منجر به افزایش چسبندگی بین زمینه و الیاف شده که این امر، باعث تقویت فصل مشترک و در نتیجه بهبود انتقال بار می‌گردد. تقویت زمینه پلیمری توسط نانورس، تمرکز تنش بر روی سطح الیاف را کاهش داده و تنش لازم برای پارگی الیاف و جدایش فصل

¹ Hydrophilic

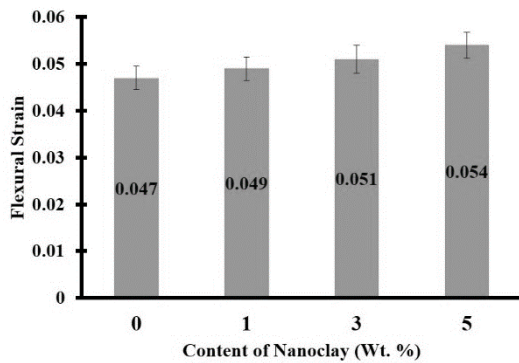


Fig. 5 Effect of modified nanoclay on the flexural strain of basalt fiber-epoxy composites

شکل 5 اثر نانورس اصلاح شده بر کرنش شکست خمشی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت

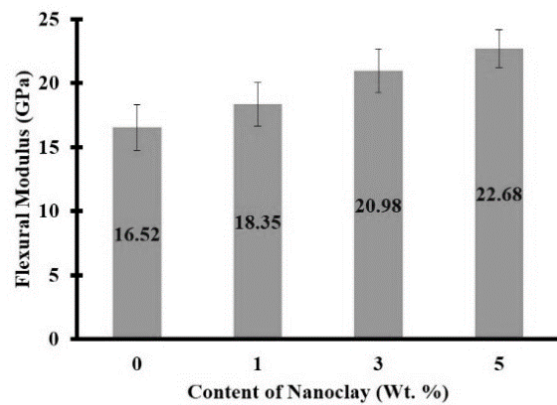


Fig. 4 Effect of modified nanoclay on the flexural modulus of basalt fiber-epoxy composites

شکل 4 اثر نانورس اصلاح شده بر مدول خمشی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت

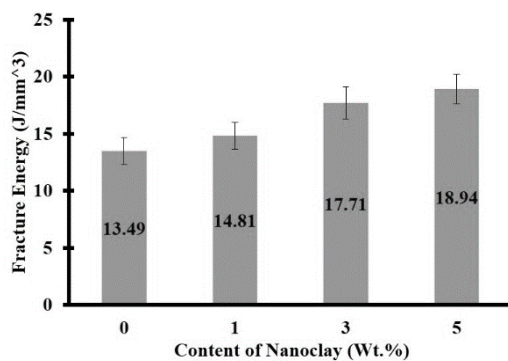


Fig. 6 Effect of modified nanoclay on the fracture energy of basalt fiber-epoxy composites

شکل 6 اثر نانورس اصلاح شده بر انرژی شکست کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف بازالت

شکل 5 تاثیر افزودن نانورس بر کرنش شکست خمشی کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت را نشان می‌دهد. با افزودن نانورس به اپوکسی، کرنش شکست کامپوزیت به طور پیوسته بهبود یافت. با افزودن 1 درصد وزنی نانورس، کرنش شکست 4 درصد افزایش یافت. این در حالی است که افزودن 3 درصد وزنی نانورس منجر به افزایش 9 درصدی در کرنش شکست شد. اما بیشترین بهبود در کرنش شکست با افزودن 5 درصد وزنی نانورس حاصل شد که در طی آن کرنش شکست 15 درصد در مقایسه با نمونه شاهد (فاقد نانورس) ارتقا یافت. نانورس به دلیل داشتن استحکام و سفتی بالا به عنوان موانعی برای رشد ترک در مسیر مستقیم به حساب می‌آید. توزیع پهنه این نانوذرات درون زمینه اپوکسی باعث می‌شود که جوانه‌زنی و اشاعه ترک به تاخیر افتد که نتیجه آن افزایش کرنش شکست کامپوزیت است [26].

از طرفی یکی از عوامل موثر در بهبود کرنش شکست علاوه بر حضور نانورس درون زمینه، بهسازی سطحی این نانوذرات توسط عامل سیلان بود. با توجه به طبیعت آب دوست نانورس توزیع مطلوب آن‌ها درون زمینه پلیمری مشکل بوده و در نتیجه عملکرد آن‌ها برای بهبود خواص کاهش می‌یابد. با اصلاح سطحی آن‌ها روند توزیع آن‌ها درون زمینه بهبود یافته و با توزیع مناسب آن‌ها چقرمگی شکست کامپوزیت به طور موثرتری افزایش می‌یابد. در شکل 6 میزان انرژی شکست کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت برحسب مقادیر مختلف نانورس آمده است. بیشترین میزان افزایش، مربوط به کامپوزیت حاوی 5 درصد وزنی نانورس حاصل شد. در کامپوزیت فاقد نانورس میزان انرژی شکست برابر با 13.49 ژول بر میلی‌متر مکعب بود. این در حالی است که با افزودن 5 درصد وزنی نانورس انرژی شکست به عدد 18.94 ژول بر میلی‌متر مکعب افزایش یافت. افزایش انرژی شکست در اثر بارگذاری خمشی به علت انحراف ترک در زمینه به وسیله نانورس باعث بهبود جذب انرژی در کامپوزیت می‌شود.

هنگامی که ترک به نانوذرات می‌رسد، برای اشاعه ترک نیاز به تغییر مسیر رشد ترک است که این امر سبب افزایش انرژی لازم برای اشاعه ترک و در نتیجه، افزایش جذب انرژی کامپوزیت می‌گردد. نکته مهم آن است که بخشی کمی از انرژی مصرف شده به دلیل طولانی‌شدن مسیر رشد ترک بوده و درصد عظیمی از آن مربوط به رشد ترک تحت مود ترکیبی I/II است. لازم به ذکر است که در این حالت، سهم عمده‌ای از انرژی داده شده به نمونه، صرف تغییر شکل آن شده که این موضوع، به نحو موثری رشد ترک را به تاخیر می‌اندازد [27].

در نهایت، به منظور بررسی تاثیر نقش عامل سیلان مورد استفاده در پراکندگی مناسب لایه‌های خاک رس، به مطالعه تاثیر حضور این عامل روی خواص خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی مورد بحث در حضور فاز تقویتی نانولوله کربنی پرداخته شد. بدین منظور، نمونه‌های مورد نظر برای انجام آزمون خمش، دوباره با تکرار پروسه اشاره شده در بخش دوم برای نانوکامپوزیت هیبریدی جدید، ساخته شده، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج مربوطه در جدول 2 آورده شده است. مهمترین نکته آن است که عامل سیلان معرفی شده در مقاله و پروسه افزودن آن برخلاف خاک رس در مورد نانولوله کربنی موثر نبوده و برخلاف نمونه‌های حاوی خاک رس، در این حالت مقدار پهنه برای نانولوله گزارش شده است. این مطلب نشان می‌دهد پروسه پراکندگی در مورد نانولوله کربنی به خوبی صفحات خاک رس صورت نگرفته است.

3-3- بررسی ریزساختاری

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های کنترلی و نمونه‌های نانوکامپوزیتی حاوی ذرات نانورس توزیع شده درون زمینه در شکل 7 مشاهده می‌گردد. برای نمونه‌های شاهد که فاقد نانورس هستند (شکل 7-الف) صاف بودن سطح شکست الیاف نشان از فصل مشترک ضعیف بین زمینه پلیمری و الیاف بازالت دارد. درمقابل، برای نمونه‌های حاوی نانورس اصلاح شده (شکل

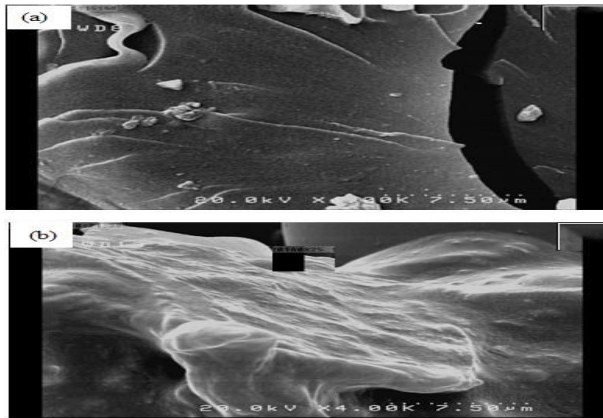


Fig. 8 Fracture surface of a) neat epoxy and b) sample containing 5 wt.% of modified nano clay

شکل 8 سطح شکست الف) اپوکسی خالص و ب) نمونه حاوی 5 درصد وزنی نانورس اصلاح شده

4- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر توزیع نانورس اصلاح شده با عامل سیلان بر عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت تحت بارگذاری خمشی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ذرات نانورس اصلاح شده در مقادیر 0، 1، 3 و 5 درصد وزنی، داخل زمینه اپوکسی توزیع شدند که نتایج نهایی این تحقیق به شرح زیر است:

- 1- نتایج حاصل از طیف سنجی مادون قرمز روند اصلاح سطحی نانورس عامل سیلان را تایید نمود.
- 2- نتایج حاصل از آزمون خمش نشان داد که افزودن 5 درصد وزنی نانورس بیشترین بهبود را خواص خمشی کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت ایجاد می‌نماید که به موجب آن استحکام خمشی، مدول خمشی، کرنش شکست و انرژی شکست به ترتیب به میزان 30، 38، 15 و 40 درصد افزایش یافتند.
- 3- بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی عمق میدانی مشخص نمود که بهبود عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت در اثر افزودن نانورس ناشی از بهبود انتقال بار بین الیاف تقویت کننده و زمینه پلیمری است.

5- مراجع

- [1] Barbero, E. J. "Introduction to Composite Materials Design: 2nd edition", CRC Press, 2010
- [2] Sano, T., Srivastan, T. S. and Peretti, M. W., "Advanced Composites for Aerospace, Marine, and Land Applications" Wiley TMS, 2014.
- [3] Deborah, D. L., "Composite Materials: Functional Materials for Modern Technologies" Springer London, 2003.
- [4] Hyer, M. W., "Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials" WCB/McGraw-Hill, New York, 1998.
- [5] Fischer, H., "Polymer Nanocomposites Fundamental Research to Specific Applications", Materials Science and Engineering C, Vol. 23, pp.763-772, 2003.
- [6] Kumar, M. S. S., Raju, N. M. S., Sampath, P. S. and Jayakumari, L. S., "Effects of Nanomaterials on Polymer Composites: An Expatriate View" Review Advanced Materials Science, Vol. 38, pp. 40-54, 2014.
- [7] Hussain, F. and Hojjati, M., "Review Article: Polymer-matrix Nanocomposites, Processing, Manufacturing, and Application: An Overview" Journal of Composite Materials, Vol. 40, No. 17, pp. 1511-1574, 2006.

7-ب) پس از شکست کامپوزیت ناشی از خمش سه نقطه‌ای مقداری از فاز زمینه پلیمری به سطح الیاف تقویت کننده بازالت الحاق یافته است که این موضوع نشان دهنده چسبندگی مطلوب بین زمینه اپوکسی و الیاف در نتیجه توزیع نانورس درون زمینه است.

جدول 2 نتایج مربوط به آزمون خمش سه نقطه‌ای برای نانوکامپوزیت حاوی نانولوله کربنی

Table 2 Results of three-point bending test for the samples reinforced with carbon nanorubes

کرنش شکست	انرژی شکست (J/mm ²)	مدول خمشی (GPa)	استحکام خمشی (MPa)	درصد وزنی نانولوله
0.047±0.0025	13.49±1.2	16.52±1.8	469.2±30	0
0.051±0.0029	16.16±1.3	19.34±1.6	534.4±25	0.1
0.055±0.003	19.82±1.4	23.47±1.5	631.38±28	0.3
0.054±0.0034	18.38±1.6	24.8±1.7	585.53±32	0.5

نتیجه‌ای که از مقایسه این دو تصویر می‌توان برداشت نمود این است که در نمونه‌های کنترلی فاقد نانولوله‌های کربنی، جدایش فصل مشترک الیاف و زمینه مکانیزم غالب شکست است. این در حالی است که در نمونه‌های با زمینه نانوکامپوزیتی مکانیزم غالب شکست ترک خوردن زمینه است. در شکل 8 تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست زمینه اپوکسی خالص و تقویت شده با نانورس اصلاح شده نشان داده شده است. در ارتباط با نمونه‌های فاقد نانورس (شکل 8-الف)، سطح شکست زمینه صاف بوده که نشان دهنده شکست ترد زمینه بوده و ترک ایجاد شده به صورت مستقیم درون زمینه اشاعه یافته است. برای نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با 5 درصد وزنی نانورس (شکل 8-ب)، ناهمواری ایجاد شده در سطح شکست نشان دهنده این مطلب است که نانوذرات توزیع شده درون زمینه به عنوان مانعی در برابر اشاعه ترک در مسیر مستقیم عمل کرده، منجر به افزایش چقرمگی کامپوزیت شده‌اند.

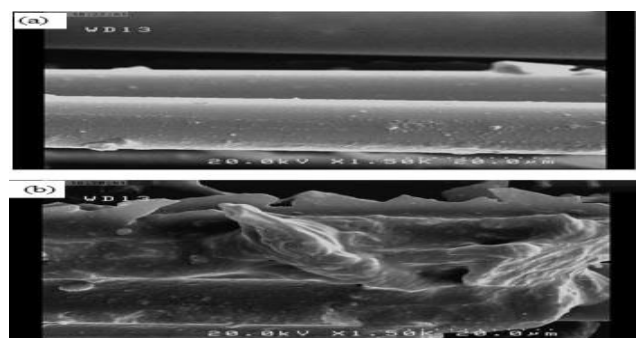


Fig. 7 Fracture surface of a) control specimen and b) sample containing 5 wt.% of modified nano clay

شکل 7 سطح شکست الف) نمونه کنترلی و ب) نمونه حاوی 5 درصد وزنی نانورس اصلاح شده

- [27] Han, J. T. and Cho, K., "Layered Silicate-Induced Enhancement of Fracture Toughness of Epoxy Molding Compounds over a Wide Temperature Range" *Macromolecular Materials and Engineering*, Vol. 290, pp. 1184-1191, 2005.
- [8] Xu, Y., Peng, H., Wang, X., and Su, S., "Comparative Study of Different Polymerically modified Clays on Curing Reaction and Thermal Properties of Epoxy Resin" *Thermochemical Acta*, Vol. 516, pp. 13-18, 2011.
- [9] J Azeez, A. A., Rhee, K. Y., Park, S. J. and Hui, D., "Epoxy Clay Nanocomposites- Processing, Properties and Applications: A review" *Composites: Part B*, Vol. 45, pp. 308-320, 2013.
- [10] Uddin, F., "Clays, Nanoclays, and Montmorillonite Minerals" *Metallurgical and Materials Transactions, A*, Vol. 39, pp. 2804-2814, 2008.
- [11] Ayatollahi, M. R., Shokrieh, M. M., Shadlou, S., Kefayati, A. R. and Chitsazadeh, M., "Mechanical and Electrical Properties of Epoxy/Multi-walled Carbon Nanotube/ Nanoclay Nanocomposites" *Iranian Polymer Journal*, Vol. 20, pp. 835-843, 2011.
- [12] Chan, M. L., Lau, K. T., Wong, T. T., Ho, M. P. and Hui, D., "Mechanism of Reinforcement in a Nanoclay/Polymer Composite" *Composites Part B-Eng*, Vol. 42, pp. 1708-1712, 2011.
- [13] Albdiry, M. T., Yousif, B. F. and Ku, H., "Fracture Toughness and Toughening Mechanisms of Unsaturated Polyester-Based Clay Nanocomposites", 13TH International Conference on Fracture June 16-21, Beijing, China, 2013.
- [14] Chowdary, M. S. and Kumar, M. S. R. N., "Effect of Nanoclay on the Mechanical properties of Polyester and S-Glass Fiber (Al)" *International Journal of Advanced Science and Technology*, Vol. 74, pp. 35-42, 2015.
- [15] Rafiq, A., Al-Qadhib, M., Merahc, N., Ali, Y., "Mechanical Behavior of Hybrid Glass Fibre/Epoxy Clay Nanocomposites" *Advanced Materials Research*, Vol. 894, pp. 336-341, 2014.
- [16] Pol, M. H., Liaghat, Gh. H., Mehrabani, Yeganeh, E., Afrouzian, A., "Experimental Investigation of Nanoclay and Nanosilica Particles Effects on Mechanical Properties of Glass Epoxy Composites" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 76-82, 2015.
- [17] Khosravi, H. and Eslami-Farsani, R., "On the mechanical characterizations of unidirectional basalt fiber/epoxy laminated composites with 3-glycidoxypropyltrimethoxysilane functionalized multi-walled carbon nanotubes-enhanced matrix" *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35(5), 421-434, 2016
- [18] Khosravi, H. and Eslami-Farsani, R., "Enhanced Mechanical Properties of Unidirectional Basalt Fiber/Epoxy Composites Using Silane-Modified Na⁺- Montmorillonite Nanoclay" *Polymer Testing*, Vol. 55, pp. 135-142, 2016.
- [19] Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM D790, 2003.
- [20] Mariche, R., Sanchez, M., Suarez, A. J., Prolongo, S. G. and Urena, A., "Electrically Conductive Functionalized- GNP/Epoxy Based Composites: From Nanocomposite to Multiscale Glass Fibre Composite Material" *Composites Part B*, Vol. 98, pp. 49-55, 2016.
- [21] Avila, A. F., Peixoto, L. G. Z, Silva Neto, A., De avila, J. and Carvalho, M. G. R., "Bending Investigation on Carbon Fiber/Epoxy Composites Nano- Modified by Graphene" *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*, Vol. 35, pp. 269- 275, 2012.
- [22] Kim, J. K. and Mai, Y. W., "Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites" Elsevier, 1998.
- [23] Singh, S. K., Singh, S., Sharma, and S., Sharma, V., "Strength Degradation of Mechanical Properties of Unidirectional E- glass Fiber Epoxy Resin Nanoclay Composites Under Hygrothermal Loading Conditions" *Procedia Materials Science*, Vol. 5, pp. 1114-1119, 2014.
- [24] Sharma, B., Khosravi, H., Chibber, S., and Mehta, R., "Effect of surface treatment of nanoclay on the mechanical properties of epoxy/glass fiber/clay nanocomposites" *Composite Interfaces*, Vol. 23, pp. 6323-640, 2016.
- [25] Rahimi, Gh.H., Zamani, R. and Pol, M. H., "Studies on The Tensile and Flexural Properties of TETA-Cured Epoxy Resins Modified With Clay" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 29-34, 2014 (In Persian).
- [26] Ngo, T. D., Nguyen, Q. T., Nguyen, T. P. and Tran, P., "Effect of Nanoclay on Thermomechanical Properties of Epoxy/Glass Fiber Composites" *Arabian Journal Science and Engineering*, Vol. 41, pp. 1251-1261, 2016.

